

# Problematyka badań współczynnika filtracji w aparacie trójosiowego ściskania

Łukasz Kaczmarek<sup>1</sup>, Agnieszka Dąbska<sup>1</sup>, Paweł Popielski<sup>1</sup>



Ł. Kaczmarek



A. Dąbska



P. Popielski

**On the issue of hydraulic conductivity tests using a triaxial compression apparatus.** *Prz. Geol.*, 70: 417–423.

*Abstract.* Laboratory tests, which enable determination of the permeability properties of soil, are distinguished by the accuracy and relatively short test time. Moreover, laboratory methods using a triaxial compression apparatus expand capability for tests with a different filtration regime and a spatial stress state applied on the analysed material. Such flexibility of research procedures allows for a number of scientific and engineering applications. The article outlines the construction of the triaxial apparatus system dedicated to filtration tests, their procedure, and important interpretation aspects.

**Keywords:** hydraulic conductivity, water flow, hydraulic gradient, stress state

Aparatura do trójosiowego ściskania jest bardzo przydatna w badaniach utworów niezlityfikowanych, czyli gruntów. Jest to związane między innymi ze zdolnością gruntów do uzyskiwania wysokiego stanu nasycenia wodą przestrzeni porowo-szczelinowych. Ta wolna przestrzeń jest determinowana stanem zagęszczenia (czy konsolidacji) gruntów, będąc efektem panującego reżimu naprężenia. Największą zaletą wyznaczania współczynnika filtracji ( $k$ ) w aparacie trójosiowego ściskania jest możliwość zadania zróżnicowanego, przestrzennego stanu naprężenia, nawiązującego do warunków *in situ*, czyli warunków, które często są złożone, odmienne na różnych głębokościach i anizotropowe. Laboratoryjne oznaczenia wartości  $k$  wymagają możliwości kontroli stanu nasycenia wodą próbki gruntu oraz stanu naprężenia efektywnego oddziałującego na badaną próbkę. Innym aspektem badań w aparacie trójosiowego ściskania jest możliwość kompleksowego określania parametrów mechanicznych gruntów oraz ich właściwości filtracyjnych także w momencie wystąpienia deformacji filtracyjnych (Cheng, Zhang, 2013; Liang i in., 2017). W artykule zaprezentowano zaawansowaną technicznie aparaturę (tj. aparat trójosiowego ściskania), wykorzystywaną do określania współczynnika filtracji gruntów o różnej litologii.

## BUDOWA APARATU TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA I JEGO ZASTOSOWANIE DO BADANIA ZDOLNOŚCI FILTRACYJNYCH GRUNTÓW

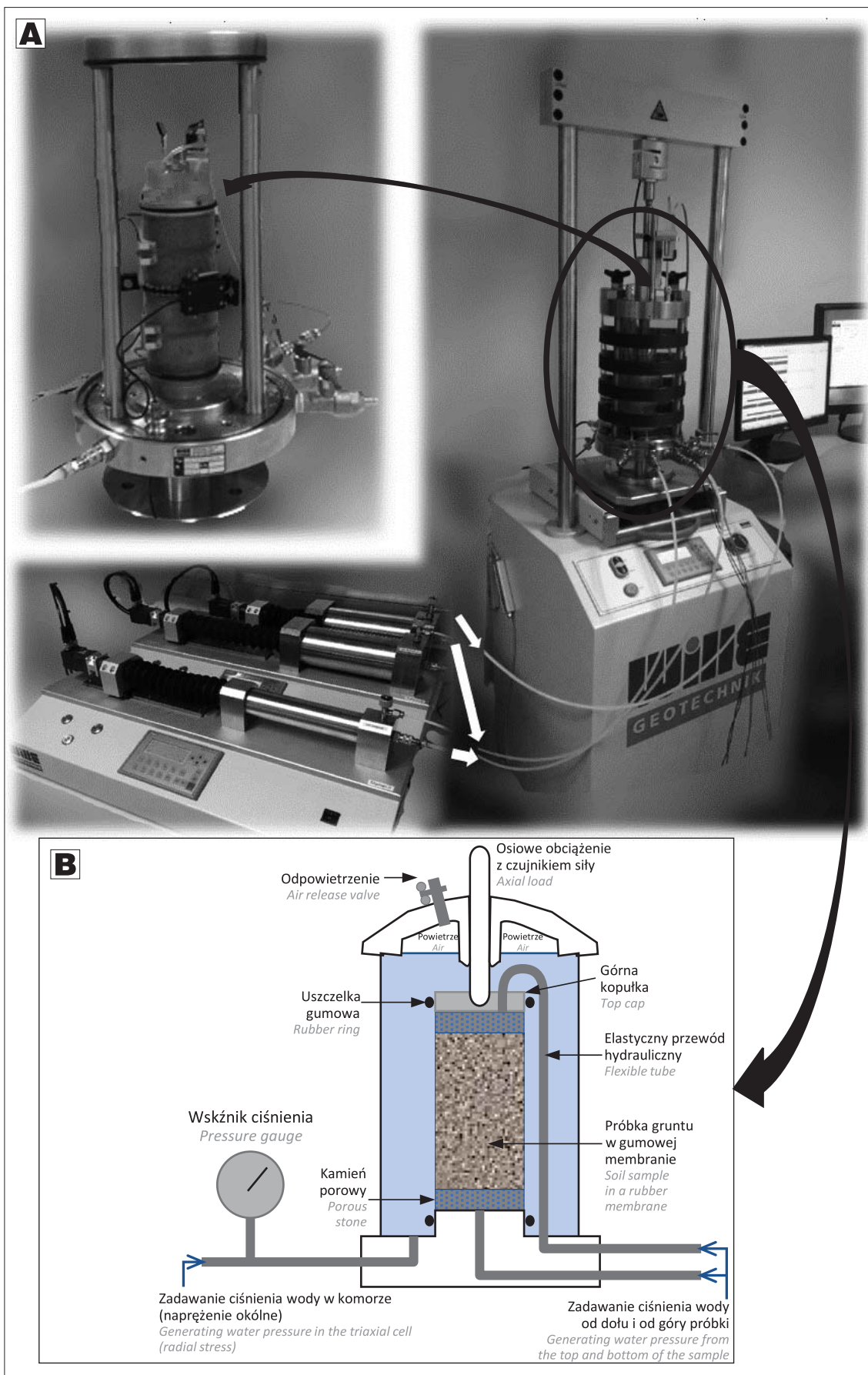
Laboratoryjny zestaw aparatu trójosiowego do badania filtracji (ryc. 1) umożliwia dopływ i odpływ wody pod różnym ciśnieniem oraz równoczesne kontrolowanie ciśnienia okólnego wody otaczającej próbkę w komorze, poprzez dolną i górną powierzchnię próbki, która jest zabezpieczona gumową membraną. Współczesne aparaty trójosiowe są zintegrowane z układami elektronicznymi oraz jednostkami sterująco-rejestrującymi (poprzez oprogramowanie zainstalowane na komputerze połączonym z aparaturą),

dzięki czemu możliwa jest częściowa automatyzacja pomiarów, jak również zwiększenie kontroli nad całą procedurą badawczą. Pozostałymi podstawowymi elementami systemów do badań w trójosiowym stanie ściskania są:

- ❑ komora trójosiowa (może być wzmocniona np. włóknem węglowym) wypełniona wodą, wykorzystywana do zadawania ciśnienia okólnego (in. bocznego) na próbkę;
- ❑ generatory ciśnienia wody (w postaci grawitacyjnych zbiorników wody i biuret lub coraz popularniejszych elektromechanicznych kontrolerów z pompami hydraulicznymi) umożliwiające uzyskanie gradientu hydraulicznego oraz ciśnienia okólnego, zintegrowane z urządzeniami do pomiaru zmiany objętości wody w próbce i komorze;
- ❑ czujniki przemieszczeń – w zależności od potrzeb przemieszczeń osiowych i radialnych w zakresie dużych lub małych odkształceń;
- ❑ prasa elektromechaniczna, która może być kontrolowana w różnych wariantach – poprzez prędkość przemieszczenia lub prędkość zadawanego obciążenia;
- ❑ czujnik obciążenia zadawanego osiowo (w celu redukcji zakłóceń odczytu zalecana jest jego lokalizacja wewnątrz komory) oraz tłok łączący czujnik siły z ramą prasy;
- ❑ dwa dyski porowe do zabezpieczenia próbki gruntu przed wymywaniem (pierwotnie wykorzystywano kamienie porowe, obecnie – ze względu na większą wytrzymałość – często wykorzystuje się spieki metaliczne), które umieszcza się od góry i od dołu walcowej próbki gruntu.

Dla uzyskania rozszerzonej charakterystyki sprężystości badanego gruntu stosuje się także elementy piezoelektryczne lub czujniki do pomiaru oporności elektrycznej (Świdziński, 2006). W badaniach filtracyjnych gruntów zawierających ziarna kwarcowe (piasek) dobrą praktyką jest wykorzystywanie dodatkowych zbiorników lub filtrów eliminujących możliwość mechanicznego uszkodzenia

<sup>1</sup> Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, 00-653 Warszawa, Nowowiejska 20; lukasz.kaczmarek@pw.edu.pl



Ryc. 1. A – Aparat trójosiowego ściskania (w tym przypadku w zakresie naprężenia do 3,5 MPa), wykorzystywany do badania współczynnika filtracji gruntów; B – Schemat działania aparatu (wg Head, 1998 – zmodyfikowana)

Fig. 1. A – Triaxial compression apparatus (in this case in the stress range up to 3,5 MPa), used to hydraulic conductivity tests of soils; B – Scheme of operation of the apparatus (according to Head, 1998 – modified)

kontrolerów do zadawania ciśnienia wody. Konieczne jest także wykorzystanie dodatkowych przyrządów do przygotowania i formowania próbek (Head, 1998).

### PROCEDURA BADANIA ZDOLNOŚCI FILTRACYJNYCH

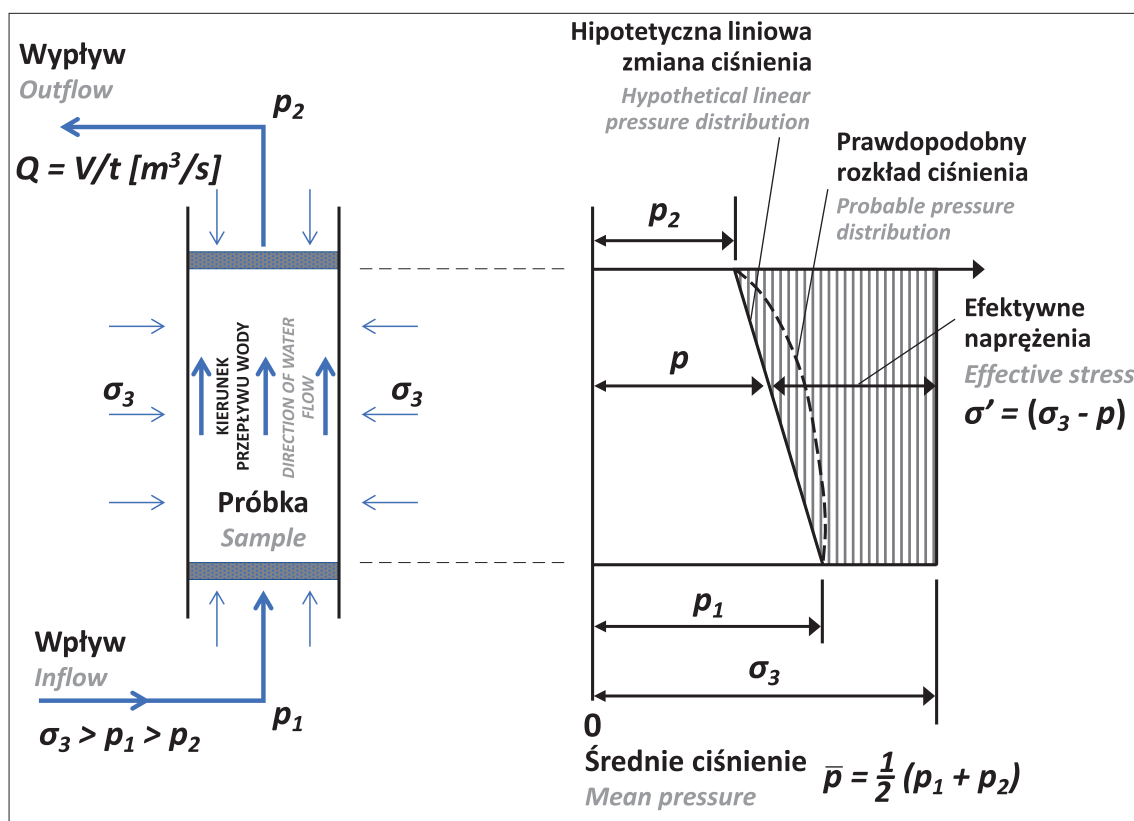
W standardowych badaniach współczynnika filtracji za pomocą aparatu trójosiowego ściskania, polegających na kontrolowaniu ciśnienia i natężenia przepływu wody, stosuje się stały lub zmienny gradient hydrauliczny (Head, 1998; PKN-EN ISO 17892-11). Przeważnie wykonuje się badanie ze stałym gradientem hydraulicznym, zadawanym przez dwa kontrolery ciśnienia wody w próbce gruntu. W trakcie badania (ryc. 2) następuje pomiar objętości wody przepływającej w określonym czasie przez próbkę gruntu z jednego kontrolera ciśnienia wody do drugiego. Na podstawie tych danych możliwe jest obliczenie współczynnika filtracji gruntu. Trzecim sposobem ustalania współczynnika filtracji gruntu jest metoda stabilizującego się gradientu – tzw. technika *flow-pump* (Olsen i in., 1991). W metodzie tej zadaje się stałą prędkość przepływu wody przez próbkę i równocześnie mierzy się różnicę ciśnień na jej obu końcach. Gradient hydrauliczny, który umożliwia stabilny przepływ wody, początkowo rośnie, aż do momentu ustabilizowania się różnicy ciśnień na krańcach analizowanej próbki. W badaniu prowadzonym tą

metodą interpretacja wyników jest możliwa nawet wówczas, gdy przepływ wody jest bardzo mały (Wdowska i in., 2017). Wykorzystując teorię konsolidacji, wartość współczynnika filtracji w badaniach trójosiowych można też wyznaczyć pośrednio, na podstawie wyników izotropowej konsolidacji próbki i współczynnika konsolidacji  $c_v$  (Head, 1998).

Badając piaski różnoziarniste, należy zwrócić uwagę na dopuszczalny, krytyczny gradient hydrauliczny, po przekroczeniu którego rozpoczyna się sufozja próbki. Na skutek tego procesu od strony wpływu wody do próbki drobniejsze cząstki osadu przemieszczają się zgodnie z kierunkiem przepływu wody, w efekcie czego poniżej może dojść do kolmatacji czyli zatykania drobniejszych porów w próbce gruntu. Z tego powodu bardzo ważny jest dobór odpowiedniej wysokości próbki, która stanowi drogę filtracji.

W badaniach gruntów spoistych szczególną uwagę należy zwrócić na konieczność wygenerowania tzw. początkowego gradientu hydraulicznego, ponieważ dopiero po jego przekroczeniu rozpoczyna się przepływ wody przez system niewielkich porów i szczelin występujących w strukturze tego typu gruntów.

Próbki gruntu przeznaczone do oceny zdolności filtracyjnych najczęściej pobiera się z otworów wiertniczych lub wykopów badawczych, a następnie umieszcza w gumowej membranie na dyskach porowych wewnątrz komo-



Ryc. 2. Stan naprężenia próbki gruntu w trakcie badania filtracji w aparacie trójosiowego ściskania z zadaniem stałym gradientem hydraulicznym. Przepływ wody odbywa się z dołu do góry próbki, na którą oddziałuje ciśnienie okólne  $\sigma_3$  wody w komorze. W trakcie takiego przepływu na szkielet gruntowy działa zmienne ciśnienie nieliniowe (wg Head, 1998 – zmodyfikowana)

Fig. 2. Scheme of the state of stress acting on a soil sample during a filtration test in a triaxial compression apparatus with a given constant hydraulic gradient. The water flow is from the bottom to the top of the sample, which is compressed by the confining pressure  $\sigma_3$ , of water in the triaxial cell. During such a flow, a non-linear pressure acts on the soil skeleton (according to Head, 1998 – modified)



ry trójosiowej aparatu. Wymagane jest pozyskanie próbek o klasie jakości 1 (wg PN-EN 1997-2), cechujących się m.in. nienaruszoną strukturą i naturalną wilgotnością. W sytuacjach, kiedy pobranie takich próbek nie jest możliwe, a konieczne jest uzyskanie współczynnika filtracji w warunkach naturalnych, pierwotną strukturę gruntu odtwarza się poprzez zagęszczanie i nawadnianie pobranych próbek.

Walcowe próbki gruntów niespoistych można formować na dwa różne sposoby: na sucho – z wykorzystaniem podciśnienia oraz na mokro – za pomocą stopniowego zagęszczania wilgotnego gruntu (ryc. 3). W metodzie na sucho wykonanie próbki znacząco ułatwia zadanie początkowej, niewielkiej wilgotności, wywołującej efekt pozornej spójności. W ten sposób można formować dowolne grunty niespoiste, chociaż w przypadku gruntów o grubszych frakcjach skuteczniejsze będzie zastosowanie podciśnienia. Warto zaznaczyć, że im większa jest średnica ziaren badanych gruntów oraz mniejszy stopień ich sferyczności i stopień obtoczenia krawędzi, tym większe jest ryzyko przerwania gumowej membrany w trakcie przygotowywania próbki do badań i w trakcie filtracji.

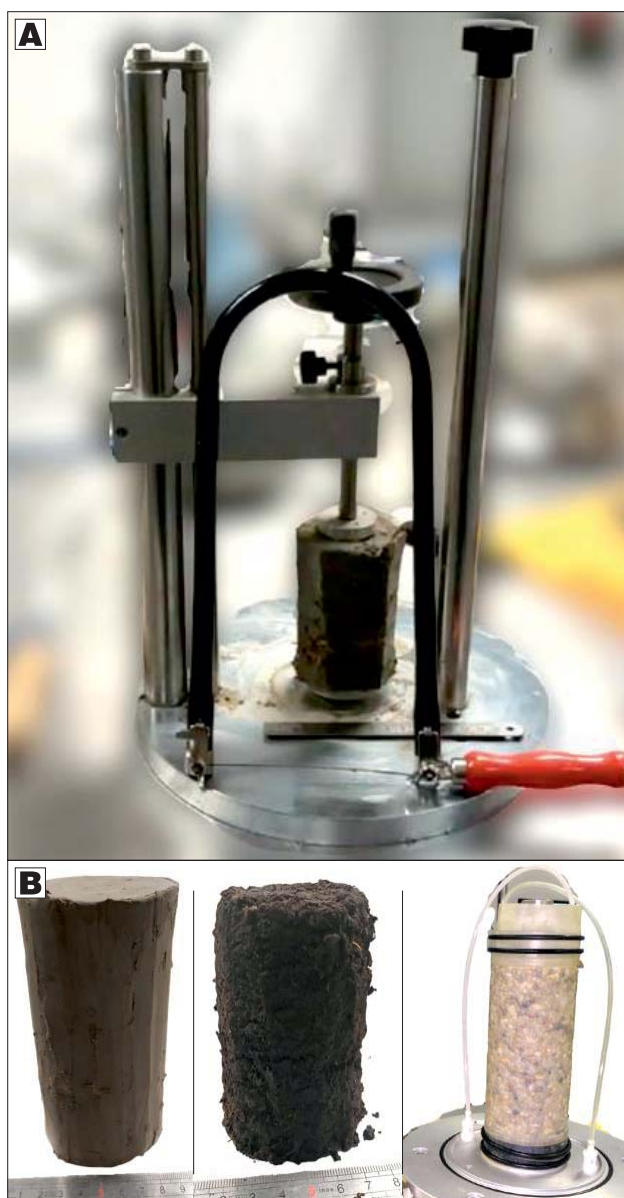
Po umieszczeniu próbki w komorze trójosiowej należy usunąć powietrze z układu zbiorniki wody–grunt. W tym celu w badaniach próbek gruntów niespoistych (np. piasku) najpierw do próbki doprowadza się od dołu wodę, aby możliwy był swobodny wypływ wody i pęcherzyków powietrza z górnej części próbki. Po wstępnym odpowietrzeniu gruntu i przewodów hydraulicznych (w badaniach gruntów spoistych i niespoistych) zamyka się zawory umożliwiające odpływ wody, a powietrze, które jeszcze pozostało w próbce, usuwa się (Head, 1998).

Prędkość saturacji gruntu jest determinowana różnicą ciśnienia wody w gruncie i ciśnienia wody w komorze (czyli tzw. naprężeniem okólnym). Czas saturacji wydłuża się wraz ze zmniejszaniem uziarnienia gruntu. Jest to istotny aspekt badań, ponieważ pęcherzyki powietrza utrudniają przepływ wody i w konsekwencji obniżają wartość współczynnika filtracji  $k$  (Wdowska i in., 2017).

Skuteczność uzyskania właściwego stopnia saturacji jest weryfikowana wartością parametru Skemptona  $B$  (tzw.  $B$ -check), co polega na porównaniu wzrostu ciśnienia wody w komorze ze wzrostem ciśnienia wody w próbce gruntu, gdzie reakcja 1:1 świadczy o całkowitej saturacji przestrzeni porowej (Bishop, Henkel, 1962).

W ostatnim etapie przed rozpoczęciem badania filtracji najczęściej przeprowadza się wstępną konsolidację próbki (izotropową lub anizotropową), to znaczy poddaje się próbkę określonego, stałemu ciśnieniu wody w komorze, wyższemu niż w trakcie saturacji. Etap ten trwa aż do ustania odpływu wody z próbki. Taki zakres badań jest rekomendowany w normach i standardach (np. PN-EN ISO 17892-11; ASTM D 5084; BS 1377 Part 6) oraz w literaturze przedmiotu (np. Head, 1998).

Szczegółowe parametry badań, takie jak: wymiar próbki, warunki saturacji, wielkość naprężenia konsolidacyjnego oraz naprężenia okólnego podczas właściwego badania filtracji, schemat badawczy (badanie ze stałym, zmiennym lub stabilizującym się gradientem) oraz kierunek przepływu wody, wartość gradientu hydraulicznego czy czas badania, są uzależnione od celu badań, typu litogenetycznego badanego gruntu, odtwarzanych warunków stanu naprężenia oraz parametrów technicznych sprzętu.



Ryc. 3. **A** – Przyrząd służący do wycinania z rdzenia wiertniczego walcowych próbek gruntu; **B** – Próbkę gruntu różnych typów – spoistego i niespoistego. Fot. Ł. Kaczmarek

Fig. 3. **A** – Instrument for cutting cylindrical soil samples from drill core; **B** – Samples of different soil types – cohesive and non-cohesive. Photo by Ł. Kaczmarek

Ciśnienie wody można przeliczyć na wysokość słupa wody, co wykorzystuje się w obliczeniach gradientu hydraulicznego ( $i = \Delta h/l$ ). Gradient  $i$  zadaje się poprzez zwiększanie ciśnienia wody w jednej części próbki i równoczesne utrzymywanie stałego ciśnienia w jej drugiej części. Po osiągnięciu warunków filtracji ustalonych na podstawie natężenia przepływu wody  $Q$  możliwe jest obliczenie współczynnika filtracji  $k$  według wzoru [1].

$$k [m/s] = \frac{Ql}{A\Delta h} \quad [1]$$

gdzie:

$Q$  – mierzony wydatek przepływu przez próbkę w określonym czasie  $t$  [ $m^3/s$ ];

$l$  – długość drogi filtracji [m];

$A$  – pole powierzchni próbki gruntu [ $m^2$ ];  
 $\Delta h$  – różnica wysokości hydraulicznej przed i za próbką [ $m$ ].

Badania filtracji gruntów dobrze przepuszczalnych (takich jak piaski) nie są czasochłonne. Natomiast badania gruntów ilastych, cechujących się małą przepuszczalnością, trwają dużo dłużej (nawet kilka dni). Z tego powodu często stosuje się znaczne, stałe różnice ciśnień wody na wpływie wody do próbki gruntu i jej wypływie ( $i \approx 30$ ; Wysokiński, Łukasik, 1996; Jaromińska, 2002; Szczepański i in., 2011). Należy też uwzględnić fakt, że zbyt wysokie różnice ciśnień mogą zainicjować konsolidację gruntu, i przez to zmienić wynik badania lub np. spowodować wypływ dodatkowej ilości wody z gruntu na skutek zmiany jego struktury (Marciniak i in., 1999). Planując gradienty hydrauliczne, warto mieć także na uwadze ograniczoną pojemność pomp hydraulicznych, jak również warunki występujące na terenie badań lub przewidywane po realizacji inwestycji (PN-EN ISO 17892-11). W trakcie obliczeń współczynnika filtracji  $k$  uwzględnia się temperaturę wody (rekomenacje PN-EN ISO 17892-11). Uzyskaną w toku badań wartość współczynnika filtracji  $k$  przelicza się do referencyjnej wartości w temperaturze wody  $T$  równej  $10^\circ C$  zgodnie ze wzorem [2]:

$$k_{10} [m/s] = \alpha \cdot k \quad [2]$$

gdzie:

$\alpha$  – współczynnik poprawkowy obliczany za pomocą wzoru Poiseuille'a [-];

$k$  – współczynnik filtracji w temperaturze  $T$  [ $^\circ C$ ].

Warto także sprawdzić wartość współczynnika filtracji dysków porowych, która powinna być większa od wartości współczynnika filtracji badanych gruntów. Do interpretacji wyników badań możliwości filtracyjnych gruntów są przydatne także wyniki nieinwazyjnych testów rozpoznawania transformacji struktury gruntów przed i po badaniu, takie jak np. metoda mikrotomografii komputerowej (Kaczmarek, Kielbasiński, 2016; Kaczmarek i in., 2017) czy SEM (Sato, Kuwano, 2015; Stajszczak i in., 2020).

### UWAGI PRAKTYCZNE

W trakcie laboratoryjnych badań wodoprzepuszczalności w próbkach gruntu mogą się rozwinąć różne mikrodeformacje filtracyjne (sufozyjne, erozyjne, deformacje warstw napinających zwierciadło wody i kolmatacje dróg przepływu), które powodują znaczne trudności w jednoznacznej interpretacji wartości współczynnika filtracji  $k$  (m.in. Riha i in., 2018; Dąbska, Popielski, 2019). Jednak odpowiednio dostosowana procedura badawcza umożliwia kontrolowanie efektów tych zjawisk. Badanie przebiegu i skutków wymienionych procesów jest bardzo istotne, ponieważ powodują one deformacje także w terenie, gdzie niejednokrotnie doprowadzają do zniszczenia struktury gruntów, generując poważne zagrożenie bezpieczeństwa infrastruktury i straty finansowe. Deformacje filtracyjne gruntu powstają w efekcie wzajemnego oddziaływania trzech niezależnych czynników (Garner, Fannin, 2010). Są to:

- podatność na przemieszczenie w porach gruntu jego cząstek lub też wynoszenie ich na zewnątrz ośrodka gruntowego, wynikające z granulometrii i krzywej uziarnienia oraz porowatości badanego gruntu;

- krytyczne warunki hydrauliczne wynikające z energii koniecznej do przemieszczenia cząstek i ziaren gruntu w warunkach filtracji wody. W tej grupie czynników występują m.in. prędkość filtracji, gradient hydrauliczny oraz ciśnienie wody w porach;
- krytyczny stan naprężenia, będący efektem naprężenia efektywnego występującego w gruncie (jego niskiej wartości), zmienny zarówno w rozpatrywanej przestrzeni (czynniki także typu wibracyjnego), ale i w czasie, w którym grunt traci zdolność przeciwdziałania deformacjom filtracyjnym (utrata odporności filtracyjnej).

Specyficzne deformacje filtracyjne powstają na skutek oddziaływania co najmniej dwóch wymienionych czynników niekorzystnie wpływających na odporność filtracyjną gruntu (ryc. 4; Dąbska, 2021). Po przekroczeniu krytycznego warunku hydraulicznego i materiałowego następują sufozja i kolmatacja (m.in. Sato, Kuwano, 2018). Wymywanie drobniejszej frakcji, głównie z piasków, powoduje stopniową poprawę właściwości filtracyjnych i pogarszanie parametrów mechanicznych (Ke, Takahashi, 2012; Sato, Kuwano, 2018), które mogą doprowadzić np. do przebicia hydraulicznego. W badaniach laboratoryjnych w jednej próbce może wystąpić sufozja i kolmatacja. Te dwa procesy często współwystępują i w warunkach przepływu wody z góry do dołu próbki w jej górnej części występuje sufozja, a przy dolnej podstawie próbki kolmatacja kontaktowa, która jest efektem braku możliwości wyniesienia cząstek z powodu ograniczenia odpływu przez papier filtracyjny oraz dyski porowe (wymywanie największych frakcji zaczyna się w miejscu wpływu wody i maleje w kierunku odpływu). Utwory spoiste są o wiele mniej podatne na sufozję, aczkolwiek w warunkach dużego gradientu hydraulicznego wystąpienie tego zjawiska nie jest wykluczone (Sato, Kuwano, 2015).

Oprócz wymienionych deformacji filtracyjnych mogą występować inne procesy zaburzające wyniki badań współczynnika filtracji gruntów, takie jak np.:

- konsolidacja gruntów ilastych;
- zamykanie się dróg przepływu w trakcie zwiększenia naprężenia efektywnego oddziałującego na grunt;
- efekt kontrakcji łąw prekonsolidowanych (dławienie wypływu cieczy przez otwory o małych rozmiarach, powodujące ograniczenie efektywnego przekroju przepływu), tj. zmniejszenie wartości współczynnika  $k$  zachodzące na skutek zwiększania gradientu hydraulicznego (pod stałym obciążeniem gruntu), opisane m.in. przez Dobaka (1999) oraz Szczepańskiego i in. (2011).
- procesy pęcznienia gruntów; konieczność uwzględnienia ciśnienia pęcznienia w toku badania spoistych gruntów potencjalnie ekspansywnych (Majer i in., 2018).

### PRZYKŁADOWE ZASTOSOWANIA WYNIKÓW BADAŃ ZDOLNOŚCI FILTRACYJNYCH GRUNTÓW

Wyniki testów filtracji w aparacie trójosiowym są przydatne m.in. do: badania wałów przeciwpowodziowych, rdzeni zapór wodnych (w których występują różne kierunki przepływu oraz stany naprężenia; ryc. 5), projektowania ujęć wód podziemnych czy tymczasowych przesłon



**Ryc. 4.** Czynniki powodujące deformacje filtracyjne gruntów (Dąbska, 2021; zmodyfikowane wg Garner, Fannin, 2010)

**Fig. 4.** Factors causing soil filtration deformation (Dąbska, 2021; modified according to Garner, Fannin, 2010)

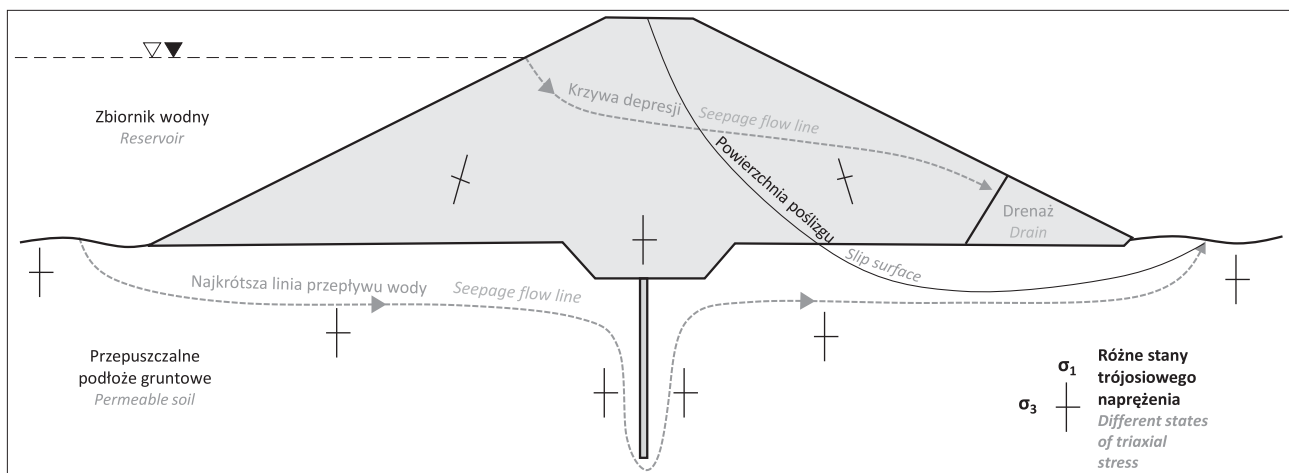
Współczynnik filtracji  $k$  jest jednym z elementarnych parametrów ośrodka gruntowego, który jest wykorzystywany w matematycznych modelach numerycznych, m.in. do różnego rodzaju analiz hydrogeologicznych, środowiskowych oraz geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych, obejmujących także aktywację osuwisk wywołanych przepływem wody (ryc. 5).

Wartości współczynnika filtracji  $k$  wyznaczone w toku badań w aparacie trójosiowego ściskania są punktem odniesienia dla wyników badań prowadzonych innymi metodami (empirycznymi, doświadczalnymi czy geofizycznymi).

W kontekście badań porowatości i szczelinowatości wpływ zmian reżimu naprężenia geostatycznego na właściwo-

ści filtracyjne gruntu jest szczególnie ważny w zagadnieniach dotyczących ujęć wód podziemnych czy analizy możliwych dróg migracji substancji z bezzbiornikowych magazynów substancji oraz składowanych odpadów zlokalizowanych poniżej powierzchni terenu. Z tym ostatnim zagadnieniem wiąże się także określanie właściwości filtracyjnych gruntów naturalnych oraz antropogenicznych (takich jak popioły czy zagęszczone szlamy), stanowiących bariery izolacyjne. Bariery te (często występujące naturalnie), są ważnym elementem ochrony środowiska, co jest także ważne w kontekście zagrożeń powodowanych przez nielegalne składowanie odpadów niebezpiecznych w strefach wahań zwierciadła wód gruntowych. W tej grupie zagadnień czas i kierunek przemieszczania się zanieczysz-

czeń filtracyjne gruntu jest szczególnie ważny w zagadnieniach dotyczących ujęć wód podziemnych czy analizy możliwych dróg migracji substancji z bezzbiornikowych magazynów substancji oraz składowanych odpadów zlokalizowanych poniżej powierzchni terenu. Z tym ostatnim zagadnieniem wiąże się także określanie właściwości filtracyjnych gruntów naturalnych oraz antropogenicznych (takich jak popioły czy zagęszczone szlamy), stanowiących bariery izolacyjne. Bariery te (często występujące naturalnie), są ważnym elementem ochrony środowiska, co jest także ważne w kontekście zagrożeń powodowanych przez nielegalne składowanie odpadów niebezpiecznych w strefach wahań zwierciadła wód gruntowych. W tej grupie zagadnień czas i kierunek przemieszczania się zanieczysz-



**Ryc. 5.** Zapora wodna z zaznaczonymi drogami przepływu wody oraz stanem naprężenia (wg Alhasan i in., 2017 – zmodyfikowana)

**Fig. 5.** Hydraulic dam with marked water flow paths and state of stress (after Alhasan et al., 2017– modified)



czeń jest bardzo ważnym aspektem badań właściwości filtracyjnych różnych ośrodków gruntowych i skalnych.

## PODSUMOWANIE

W aparacie trójosiowego ściskania badania właściwości filtracyjnych gruntów są prowadzone w warunkach zmiennego, stałego lub stabilizującego się gradientu ciśnienia, jednoetapowo lub wieloetapowo, z przepływem wody do góry lub do dołu i mogą być połączone z badaniami wytrzymałościowymi na ściskanie, umożliwiającymi kontrolę prędkości odkształcenia lub naprężenia po zadaniu określonej ścieżki naprężenia.

Istnieje wiele czynników zmieniających wodoprzepuszczalność gruntów, ich oddziaływanie zmienia także właściwości mechaniczne gruntów. Testy prowadzone w aparacie trójosiowego ściskania dają możliwości symultanicznego badania właściwości filtracyjnych oraz mechanicznych gruntów. Aparat trójosiowego ściskania jest uniwersalnym narzędziem do wyznaczania charakterystyk filtracyjnych gruntu, weryfikacji innych wyników badań oraz prognozowania właściwości ośrodka gruntowego. W celu optymalnego wykorzystania aparatury konieczna jest dobra znajomość procedur badawczych.

Stan naprężenia gruntu oddziałuje na jego wodoprzepuszczalność, dlatego chcąc uzyskać wartość współczynnika filtracji *in situ*, cechującą dane wydzielenie litologiczne, najkorzystniej jest prowadzić laboratoryjne badania filtracji z wykorzystaniem aparatu trójosiowego ściskania. Zależność wartości współczynnika filtracji *k* od obciążenia nie zawsze jest liniowa, toteż często konieczne jest indywidualne wyznaczanie doświadczalnych charakterystyk badanych gruntów.

Autorzy dziękują Recenzentom za czas poświęcony na sprawdzenie artykułu, cenne spostrzeżenia i uwagi. Artykuł opracowano dzięki dofinansowaniu badań z grantu dziekańskiego nr 504/04612, uzyskanego na Wydziale Instalacji Budowanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.

## LITERATURA

- ALHASAN Z., MICA L., RIHA J. 2017 – Comments on the influence of stress state on internal instability in soils. [W:] XVII Technical Dam Control International Conference, Stryżawa.
- ASTM D5084 – Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter.
- BISHOP A. W., HENKEL D. J. 1962 – The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test (2<sup>nd</sup> edn.). St. Martin's Press.
- BS 1377-6:1990 – Methods of test for soils for civil engineering purposes. Consolidation and permeability tests in hydraulic cells and with pore pressure measurement.
- CHANG D.S., ZHANG L.M. 2013 – Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress States. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 139, 1454–1467. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000871.
- DĄBSKA A. 2021 – Odporność filtracyjna piasków. Oficyna Wyd. PW.
- DĄBSKA A., POPIELSKI P. 2019 – Deformacje filtracyjne gruntów – klasyfikacja. Gospodarka wodna, 8: 7–13.
- DOBAK P. 1999 – Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Studia, Rozprawy, Monografie 65, Warszawa.
- GARNER S., FANNIN J. 2010 – Understanding internal erosion: a decade of research following a sinkhole event. International Journal on Hydropower and Dams, 17 (3): 93–98.
- HEAD K.H. 1998 – Manual of Soil Laboratory Testing, 3: Effective Stress Tests. Wiley.
- JAROMIŃSKA M. 2002 – Badania współczynnika filtracji gruntów słabo przepuszczalnych. Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej, Seria: Budownictwo, 95: 241–250.
- KACZMAREK Ł., KIEŁBASIŃSKI K. 2016 – Propozycja wykorzystania wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej do analizy gruntu spoistego w badaniach pełzania. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 25 (3): 277–289.
- KACZMAREK Ł., DOBAK P., KIEŁBASIŃSKI K. 2017 – Preliminary investigations of creep strain of Neogene clay from Warsaw in drained triaxial tests assisted by computed microtomography. Studia Geotechnica et Mechanica, 39 (2): 35–49.
- KE L., TAKAHASHI A. 2012 – Strength reduction of cohesionless soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow. Soils and Foundations, 52 (4): 698–711.
- LIANG Y., JIM YEH T., ZHA Y., WANG J., LIU M., HAO Y. 2017 – Onset of suffusion in gap-graded soils under upward seepage. Soils and Foundations, 57 (5): 849–860.
- MAJER E., SOKOŁOWSKA M., FRANKOWSKI Z., BARAŃSKI M., BESTYŃSKI Z., OSTROWSKI S., PASIECZNA A., PIETRZYKOWSKI P., PRZYŁUCKA M., BŁACHNIO O., CHADA M., CZARNIAK P., DZIEKAN-KAMIŃSKA E., JAROS M., JUDKOWIAK M., ŁUKAWSKA A., MAJER K., PACANOWSKI G., PIECHOTA A., ROGUSKI A., RYŻYŃSKI G., SAMEL I., SOKOŁOWSKI J., SZABŁOWSKA M., SZLASA M. 2018 – Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskiego (w świetle wymagań Eurokodu 7). Państw. Inst. Geol.
- MARCINIAK M., PRZYBYŁEK J., HERZIG J., SZCZEPAŃSKI J. 1999 – Badania współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych w cylindrach. Gosp. Sur. Miner., 15 (2): 107–123.
- OLSEN H.W., GILL J.D., WILDEN A.T., NELSON K.R. 1991 – Innovations in hydraulic-conductivity measurements. Transportation research record, 1309: 9–17.
- PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 17892-11:2019-08 Rozpoznanie i badanie geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 11: Badania filtracji.
- RIHA J., ALHASAN Z., PETRULA L., POPIELSKI P., DĄBSKA A., FRY A.J., SOLSKI S.V., PEREVOSHCHIKOVA N.A., LANDSTORFER F. 2018 – Harmonisation of Terminology and Definitions on Soil Deformation Due to Seepage. [W:] Bonelli S., Jommi C., Serpi D. (red.): Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees. Materiały konferencyjne EWG?IE 26<sup>th</sup> Annual Meeting, 10–13.09.2018 Milan: 347–366. DOI: 10.1007/978-3-319-99423-9\_31
- SATO M., KUWANO R. 2015 – Suffusion and clogging by one-dimensional seepage tests on cohesive soil. Soils and Foundations, 55 (6): 1427–1440.
- SATO M., KUWANO R. 2018 – Laboratory testing for evaluation of the influence of a small degree of internal erosion on deformation and stiffness. Soils and Foundations, 58: 547–562.
- STAJSZCZAK P., DOBAK P., GENDEK K. 2020 – Zmiany właściwości konsolidacyjnych, filtracyjnych i mikrostrukturalnych glin lodowcowych w przebiegu badań konsolidacji z ciągłym wzrostem obciążenia. Prz. Geol., 68 (11): 843–852.
- SZCZEPAŃSKI T., WÓJCIK E., GAWRIUCZENKOW I. 2011 – Zmienność współczynnika filtracji w zależności od spadku hydraulicznego na przykładzie badań glin w miejscowości Różanka. Biul. Państw. Inst. geol., 446: 417–422.
- ŚWIDZIŃSKI W. 2006 – Mechanizmy zagęszczania i upłynniania gruntów sypkich. Wyd. IBW PAN.
- WDOWSKA M.K., LIPIŃSKI M.J., JAROŃ Ł. 2017 – Uwarunkowania doboru metody określenia współczynnika filtracji w gruntach spoistych. Acta Sci. Pol. Architectura, 16 (3): 47–57.
- WYSOKIŃSKI L., ŁUKASIK S. 1996 – Badania szczelności izolacji mineralnych składowiska odpadów. Instrukcja ITB nr 339/96.

Praca wpłynęła do redakcji 10.08.2021 r.

Akceptowano do druku 30.11.2021 r.